

磁悬浮列车轨道间隙控制系统的自适应控制

左元华¹, 陈复扬², 齐瑞云²

(1. 华东石油技师学院 机械工程系, 江苏 扬州 225129; 2. 南京航空航天大学 自动化学院, 江苏 南京 210016)

摘要:建立磁悬浮列车悬浮模型,采用状态反馈控制、模型参考自适应控制方法,研究磁悬浮列车轨道间隙控制问题。仿真表明,设计的极点配置状态反馈控制器能使磁悬浮列车轨道间隙控制系统稳定,基于李雅普诺夫稳定性理论设计的模型参考自适应控制方法具有较高的控制精度和一定的快速性。

关键词:磁悬浮列车;轨道间隙控制;状态反馈控制;自适应控制

中图分类号: TP273

文献标识码: A

文章编号: 1671-5322(2009)04-0028-04

磁悬浮列车通过电磁铁所提供的磁力作为支撑使得列车“悬浮”空中,通过直线电机提供列车运行所需要的牵引力,磁悬浮列车在运行速度、爬坡和转弯能力、舒适度等方面要优于轮轨系统,为地面交通技术的发展开辟了新的道路。

常规的PID控制以及单一的状态反馈控制已无法完成磁悬浮列车轨道间隙精确控制^[1-2],并且抗干扰能力差。本文主要针对磁悬浮间隙控制系统进行建模、线性化以及极点配置状态反馈控制律设计^[3-6]和自适应控制律设计^[7-8],分析自适应控制律引入的优点。仿真表明,本文设计的极点配置状态反馈控制器能使磁悬浮列车轨道间隙控制系统稳定,基于李雅普诺夫稳定性理论设计的模型参考自适应控制方法具有较高的控制精度和一定的快速性。

1 磁悬浮列车悬浮模型建立

磁悬浮列车是一个受电磁铁和导轨间作用力控制的六自由度空间自由体,悬浮、导向、驱动三大控制模块缺一不可。磁悬浮列车技术主要保证在各种内外扰动作用下磁悬浮列车仍然能够保持平衡稳定的悬浮,这使得悬浮控制模块非常重要,是磁悬浮列车的核心和关键技术之一。

图1为悬浮模型,图中为电磁铁就对衔铁产生的吸力;为电磁铁质量;是干扰,是悬浮气隙。

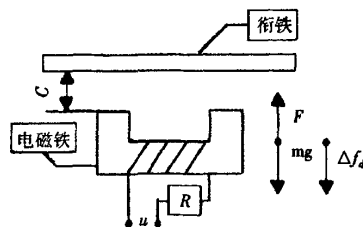


图1 单铁悬浮模型

Fig. 1 One anchor suspension model

当电磁铁中通以电流后电磁铁就对衔铁产生吸力,其大小为

$$F(i, t) = K \left[\frac{i(t)}{c(t)} \right]^2 \quad (1)$$

式中:系数 K 由电磁铁的线圈匝数和截面积确定,设标称工作点为 i_0 和 c_0 满足

$$F(i_0, c_0) = K \left[\frac{i_0}{c_0} \right]^2 = mg \quad (2)$$

对(2)式所示非线性模型局部线性化。当气隙在标称的工作点 c_0 附近有一变化 Δc 时,即 $c = c_0 + \Delta c$,此时

$$F(i_0, c) = K \left[\frac{i_0}{c_0 + \Delta c} \right]^2 \neq mg$$

若不调整电磁铁电流,则电磁铁不是掉下去,就是吸到衔铁上,对式(1)在标称工作点 (i_0, c_0) 附近线性化,由泰勒展开,并在展开式中舍去高次项,

收稿日期:2009-07-30

基金项目:国家自然科学基金资助项目(90816023)

作者简介:左元华(1976-),女,江苏盐城人,讲师,主要研究方向为机电一体化教学与科研。

取前两项得:

$$F(i_0 + \Delta i, c_0 + \Delta c) = F(i_0, c_0) + (\Delta i \cdot \frac{\partial}{\partial i} + \Delta c \cdot \frac{\partial}{\partial c})F(i_0, c_0) \quad (3)$$

由(2)式可得

$$mg + (\Delta i \cdot \frac{\partial}{\partial i} + \Delta c \cdot \frac{\partial}{\partial c})F(i_0, c_0) = \quad (4)$$

其中

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial i}F(i_0, c_0) &= \frac{2Ki_0}{c_0^2} \cdot \Delta i \\ \frac{\partial}{\partial c}F(i_0, c_0) &= -\frac{2Ki_0^2}{c_0^3} \cdot \Delta c \end{aligned} \quad (5)$$

将(4)式改写为如下形式

$$mg - F(i_0 + \Delta i, c_0 + \Delta c) = \frac{2Ki_0^2}{c_0^3} \cdot \Delta c - \frac{2Ki_0}{c_0^2} \cdot \Delta i \quad (6)$$

由于

$$mg - F(i_0 + \Delta i, c_0 + \Delta c) = m\ddot{\Delta c} = m\Delta \ddot{c} \quad (7)$$

则

$$m\Delta \ddot{c} = \frac{2Ki_0^2}{c_0^3} \cdot \Delta c - \frac{2Ki_0}{c_0^2} \cdot \Delta i \quad (8)$$

由于电流环的带宽较宽,气隙变化较小时,可将电流环等效为一比例环节,即

$$\frac{K_s}{1 + T_s S} \approx K_s \quad (9)$$

磁悬浮系统的控制模型可简化为如下形式

$$G(s) = \frac{\Delta c(s)}{\Delta u(s)} = \frac{-K_s K_i / m}{s^2 - K_s / m} = \frac{-K_s K_i}{sm^2 - K_s} \quad (10)$$

本文只针对某磁悬系统的电磁铁参数和标称工作气隙值进行研究,其中 $i_0 = 29.6 \text{ A}$; $c_0 = 0.01 \text{ m}$; $m = 750 \text{ kg}$; $K = \frac{\mu_0 N^2 A}{4} = 0.000855$; $K_s = 10 \text{ A/V}$; $K_i = \frac{2Ki_0^2}{c_0^3} = 1.498 \times 10^6 \text{ N/m}$; $K_i = \frac{\mu_0 N^2 A i_0}{2c_0^2} =$

$$\frac{2Ki_0}{c_0^2} = 506.16 \text{ N/A}$$

将(10)式改写成状态空间表达式:

$$\begin{aligned} \dot{x} &= Ax + B\Delta u \\ y &= Cx \end{aligned} \quad (11)$$

式中

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ \frac{K_s}{m} & 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ \frac{1.498 \times 10^6}{750} & 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 2000 & 0 \end{bmatrix} \quad (12)$$

$$B = \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{K_s K_i}{m} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ -\frac{5061.6}{750} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ -6.75 \end{bmatrix} \quad (13)$$

$$C = [1 \quad 0] \quad (14)$$

2 状态反馈控制律设计

为保证控制系统稳定运行,首先采用极点配置方法设计状态反馈控制律使磁悬浮列车平稳悬浮。系统的可控性判别矩阵为 $Q_c = [B \quad AB] = \begin{bmatrix} 0 & -6.75 \\ -6.75 & 0 \end{bmatrix}$, $\text{rank } Q_c = 2 = n$, 系统可控,满足可配置条件。将系统闭环特征配置为 $\lambda_1 = -20 + j10$, $\lambda_2 = -20 - j10$, 则期望的特征多项式为

$$\begin{aligned} a^*(s) &= (s - \lambda_1)(s - \lambda_2) = \\ &= (s + 20 - j10)(s + 20 + j10) = s^2 + 40s + 500 \end{aligned} \quad (15)$$

可得

$$\begin{aligned} k = \bar{k}P &= [2500 \quad 40] \begin{bmatrix} -0.1481 & 0 \\ -370.25 & -5.924 \end{bmatrix} = \\ &= [-370.25 \quad -5.924] \end{aligned} \quad (16)$$

将状态反馈加入到原系统中, Simulink 中搭建控制系统结构图见图2。

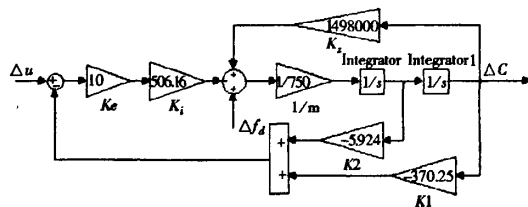


图2 状态反馈方法结构图

Fig. 2 Structure chart for state feedback

加入状态反馈后系统对外部扰动阶跃信号(1 s末加入)的响应曲线见图3。

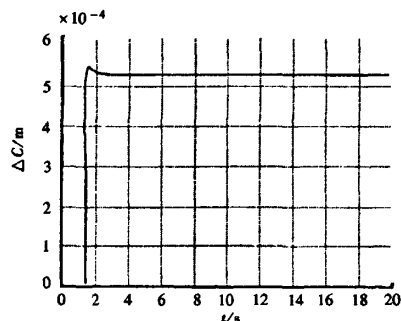


图3 状态反馈控制下的仿真曲线

Fig. 3 Simulation curve for state feedback control

3 自适应控制律设计

为提高控制精度和抗干扰能力,采用基于李雅普诺夫稳定性理论设计模型参考自适应控制律方法对磁悬浮列车间隙控制系统进行精确控制,自适应控制结构图如图 4 所示。

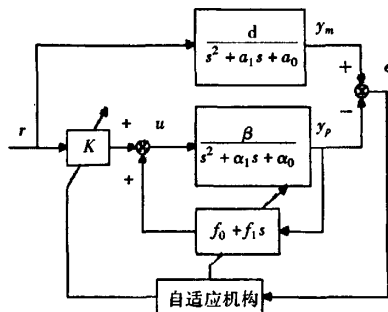


图 4 自适应控制方法结构图

Fig. 4 Structure chart for self-adaptive control

其中自适应机构为

$$\begin{cases} f_0 = f_0(0) - \int_0^t \frac{(eP_{12} + \dot{e}P_{22})\gamma_p}{\eta_0 b} \cdot d\tau \\ f_1 = f_1(0) - \int_0^t \frac{(eP_{12} + \dot{e}P_{22})\dot{\gamma}_p}{\eta_1 b} \cdot d\tau \end{cases} \quad (17)$$

则

$$Q = \begin{bmatrix} 10 & 0.28 & 0 \\ 0 & 780 & 0 \end{bmatrix}$$

$$A_2^T P + P A_2 = -Q$$

$$P = \begin{bmatrix} P_{11} & P_{12} \\ P_{21} & P_{22} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 5 & 414 & 10 \\ & 10 & 10 \end{bmatrix}$$

加入外部扰动时,得到仿真曲线如图 5。

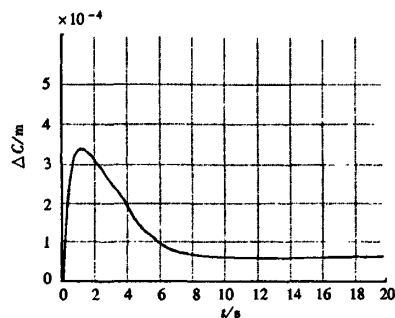


图 5 自适应控制下的仿真曲线

Fig. 5 Simulation curve for self-adaptive control

比较图 5 与图 3,在同样的外部扰动下,自适应控制在系统输出误差上要比状态反馈控制要小的多,系统的抖动小,能够满足系统的控制要求。

4 结论

本文针对磁悬浮列车轨道间隙控制系统进行状态反馈控制和模型参考自适应控制方法的比较研究。仿真表明,采用极点配置状态反馈控制器使磁悬浮列车轨道间隙控制系统稳定;采用基于李雅普诺夫稳定性理论设计的模型参考自适应控制方法具有较高精度和一定的快速性,为自适应控制技术在磁悬浮列车控制中的全面应用提供理论依据。

参考文献:

- [1] 邓永权. 磁悬浮列车静悬稳定性与仿真分析[D]. 成都:西南交通大学,2005.
- [2] 李剑锋. 常导高速磁悬浮列车搭接结构的悬浮控制技术研究[D]. 长沙:国防科学技术大学,2005.
- [3] 陈复扬,姜斌. 自适应控制与应用[M]. 北京:国防工业出版社,2009.
- [4] 刘恒坤,郝阿明,常文森. 磁悬浮系统的非线性 PID 控制[J]. 控制工程,2007,14(6):653-656.
- [5] 李云钢,常文森. 磁浮列车悬浮系统的串级控制[J]. 自动化学报,1999,25(2):247-251.
- [6] 龙志强,郝阿明,常文森. 考虑轨道周期性不平顺的磁浮控制系统设计[J]. 国防科技大学学报,2003,25(2):84-89.
- [7] 刘恒坤,常文森. 磁悬浮系统的两种线性化控制方法[J]. 自动化技术与应用,2005,24(1):14-7.
- [8] 左元华,姜斌,陈复扬. 悬臂梁主动控制与模型参考自适应控制比较研究[J]. 计算技术与自动化,2007,26(4):1-4.

Self – adaptive Control of Magnetic Suspension Train Track Gap Control System

ZUO Yuan-hua¹, CHEN Fu-yang², QI Rui-yun²

(1. Department of Mechanical Engineering, Eastchina Petroleum Technician College, Jiangsu Yangzhou 225129, China;
2. College of Automation Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Jiangsu Nanjing 210016, China)

Abstract: The model of magnetic suspension train is founded according to the method of self – adaptive control. Magnetic suspension train track gap control system is investigated using state feedback control. Simulation results show that state feedback controller is designed to guarantee the stability of magnetic suspension train system and model reference adaptive control based on Lypunov's Second Method has high precision and speed.

Keywords: magnetic suspension train; track gap control; state feedback control; self – adaptive control

(责任编辑:沈建新;校对:张英健)

(上接第27页)

AT 变压器附近时较小,呈现抛物线形状。

3 结束语

本文通过对 DF 供电方式下一臂牵引网短路的建模、仿真,分析了牵引供电系统在短路情况下牵引馈线电压、电流的变化情况,以及在有 AT 及 BT 时牵引网短路时的故障特征。实践证明,应用

MATLAB 的电力系统工具箱,可以很方便的通过拖动鼠标,放置、连接组件来构建牵引供电系统的仿真模型;从而可以避免传统的繁琐的人工建模、分析算法、编制程序等工作。使工程人员可以集中精力研究牵引供电系统本身的特性。为结构复杂的牵引供电系统的故障分析提供了一种方便、灵活的新方法。

参考文献:

- [1] 谭秀炳,刘向阳. 交流电气化铁道牵引供电系统[M]. 成都:西南交通大学出版社,2007.
- [2] 于万聚. 高速化电气化铁路接触网[M]. 成都:西南交通大学出版社,2002.

The Simulation of Traction Power Supply System's Fault based on MATLAB

CHENG Hong-bo¹, WANG Yin-le¹, CHEN Zhi-jian², CHEN Wei¹

(1. School of electrical and electronic engineering, East China Jiaotong University, Jiangxi Nanchang 330013, China;
2. Chengdu Railway Bureau Chongqing Power Supply Section, Chongqing 400053, China)

Abstract: This paper introduces the traction power supply system, and analyses its equivalent circuit and equivalent impedance. The short – circuit fault's simulation model has been established using the MATLAB toolbox. The waves of voltage and current which occurred at the fault point were got. The impedance curve along with the distance of tractionnet's breakpoint has been measured. The characteristic at fault was analysed.

Keywords: traction power supply system; fault; equivalent circuit; Matlab simulation; fault characteristics

(责任编辑:沈建新;校对:张英健)